

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Katedra elektroniky

Návrh hlavního měniče akumulátorové  
lokomotivy

Design of main converter of  
accumulator locomotive

6. 5. 2011

Bc. Martin Tvrdoň

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektroniky

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Martin Tvrdoň**  
Studijní program: N2649 Elektrotechnika  
Studijní obor: 2612T015 Elektronika  
Téma: **Návrh hlavního měniče akumulátorové lokomotivy**  
**Design of main converter of accumulator locomotive**

Zásady pro vypracování:

1. Provedte dimenzování hlavního měniče akumulátorové lokomotivy pro jmenovité napětí akumulátoru  $U_n = 850 \text{ V}$  a jmenovitý výkon připojeného třífázového motoru  $P_n = 300 \text{ kW}$ .
2. Navrhněte elektrická schémata hlavních i pomocných obvodů měniče a návaznosti na požadavky norem a předpisů proveďte rozbor koncepcí konstrukčního řešení měniče.
3. Provedte výběr vhodných polovodičových, pasivních a konstrukčních součástí měniče a navrhněte jeho 3D model.
4. K navrženému měniči zpracujte technickou dokumentaci.

Seznam doporučené odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího diplomové práce.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Petr Chlebiš, CSc.**

Datum zadání: 19.11.2010

Datum odevzdání: 06.05.2011

---

doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.  
*vedoucí katedry*

---

prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
*děkan fakulty*

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 6. 5. 2011

Martin Tvrdoň

Děkuji svému vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Petrovi Chlebišovi, CSc. za odborné rady, které mi poskytl v průběhu plnění mé diplomové práce.

## **Abstrakt**

Práce se zabývá konstrukčním návrhem hlavního měniče akumulátorové lokomotivy. V úvodní části je provedena rešerše v oblasti trakčních vozidel zaměřená na jejich rozdělení, možnosti napájení elektrických trakčních vozidel a možnosti elektrických pohonů trakčních vozidel. V návaznosti na tuto rešerši je provedena specifikace elektrické lokomotivy pro nezávislou trakci. Dále je dimenzován hlavní měnič pro pohon specifikované lokomotivy. Pro nadimenzovaný měnič jsou navržena elektrická schémata hlavních a vedlejších obvodů, je provedeno dimenzování jednotlivých komponent měniče a vytvořen konstrukční návrh 3D modelu hlavního měniče v programu Autodesk Inventor. Tento návrh je popsán. V přílohové části této práce je výkresová dokumentace k jednotlivým konstrukčním prvkům měniče, které je nutno vyrobit pro jeho realizaci.

## **Abstract**

The work deals with the engineering design of the accumulator locomotive's main converter. In the opening chapter there is made the background research in the sphere of traction vehicles, focused on their division, power supply possibilities of the electric traction vehicles and the electric drive possibilities of the traction vehicles. Following this background research, the specification of the electric locomotive for independent traction is carried out. Further, there is dimensioned the main converter for the drive of the specified locomotive. For the dimensioned converter there is made a proposal of the electric schematics of both the main and the secondary circuits, there is realized the dimensioning of the particular converter's components and created the engineering design of the main converter 3D model in Autodesk Inventor program. This design is described. In the supplementary part of this work there is the drawing documentation for the various constructional elements of the converter that have to be produced for its realization.

**Klíčová slova:** elektrická trakce, trakční vozidla, výkonový měnič, konstrukce, napěťový střídač.

**Key words:** electric traction, traction vehicle, power converter, construction, voltage inverter.

## Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbol	Jednotka	Význam
$\Delta P_Z$	W	Ztrátový výkon na spínacích součástkách
$\Delta T_{h-w}$	K	Tepelný spád mezi chladičem a chladicí kapalinou
$\Delta T_{j-w}$	K	Tepelný spád mezi polov. přechodem a chladicí kapalinou
$f_s$	Hz	Spínací frekvence
I	A	Efektivní hodnota fázového proudu
$I_{AC}$	A	Proud střídavým obvodem
$I_C$	A	Stálý kolektorový proud
$I_{C\text{ nom}}$	A	Stejnoseměrný kolektorový proud
$I_{C\text{ RM}}$	A	Opakovatelný špičkový kolektorový proud
$I_{DC}$	A	Proud stejnosměrným obvodem
$I_M$	A	Amplituda fázového proudu
$I_P$	A	Primární proud
$I_{PN}$	A	Nominální primární proud RMS
$I_{SN}$	A	Nominální sekundární proud RMS
J	Amm <sup>2</sup>	Proudová hustota
$K_N$	-	Převodní konstanta
$P_1$	W	Příkon střídače
$P_2$	W	Výkon střídače
$R_{CE}$	$\Omega$	Dynamický odpor v sepnutém stavu
$R_{Goff}$	$\Omega$	Sériový odpor k hradlu při vypnutí
$R_{Gon}$	$\Omega$	Sériový odpor k hradlu při zapínání
$R_{TH(j-c)}$	K/W	Tepelný odpor mezi polovodičovým přechodem a pouzdrem
$R_{TH(c-h)}$	K/W	Tepelný odpor mezi pouzdrem a chladičem
$R_{TH(h-w)}$	K/W	Tepelný odpor mezi chladičem a chladicí kapalinou

$S_{AC}$	$\text{mm}^2$	Průřez vodičů střídavého obvodu
$S_{DC}$	$\text{mm}^2$	Průřez vodičů stejnosměrného obvodu
$T_j$	$^{\circ}\text{C}$	Teplota polovodičového přechodu
$T_{jm}$	$^{\circ}\text{C}$	Maximální teplota chladicí kapaliny
$T_c$	$^{\circ}\text{C}$	Teplota pouzdra
$T_h$	$^{\circ}\text{C}$	Teplota chladiče
$T_w$	$^{\circ}\text{C}$	Teplota chladicí kapaliny
$t_{d\ off}$	s	Vypínací doba
$t_{d\ on}$	s	Zapínací doba
$U_C$	V	Napájecí napětí
$U_{CE}$	V	Napětí mezi kolektorem a emitorem v závěrném směru
$U_{CES}$	V	Maximální blokovací napětí
$U_{CE\ sat}$	V	Saturační napětí mezi kolektorem a emitorem
$U_{DC}$	V	Napětí stejnosměrného obvodu
$U_{GE}$	V	Špičkové napětí mezi hradlem a emitorem
$U_{PM}$	V	Primární napětí
$U_{PN}$	V	Nominální primární napětí RMS

## Obsah

Úvod .....	9
1. Trakční vozidla .....	10
1.1 Napájení trakčních vozidel .....	10
1.1.1 Závislá trakce .....	10
1.1.2 Nezávislá trakce .....	11
1.2 Hlavní měniče v trakčních vozidlech .....	12
1.3 Provedení elektrických pohonů trakčních vozidel .....	13
1.3.1 Stupňovité řízení se stejnosměrným sériovým motorem .....	13
1.3.2 Pohon se stejnosměrným cize buzeným motorem s plynulou regulací .....	13
1.3.3 Pohon s asynchronním motorem s kmitočtově řízeným střídačem .....	14
1.4 Specifikace elektrické lokomotivy pro nezávislou trakci .....	18
2. Dimenzování hlavního měniče .....	19
3. Návrh elektrických schémat .....	20
4. Výběr komponent a návrh 3D modelu napěťového střídače .....	23
4.1 Dimenzování komponent napěťového střídače .....	23
4.1.1 Napěťové dimenzování .....	23
4.1.2 Proudové dimenzování .....	23
4.2 Výběr komponent napěťového střídače .....	24
4.3 Návrh chladičového systému .....	29
4.3.1 Výpočet ztrátového výkonu IGBT modulů .....	29
4.3.2 Návrh chladičového obvodu .....	30
4.3.3 Popis chladičového systému .....	32
4.4 3D model napěťového střídače .....	33
Závěr .....	39
Literatura .....	40
Seznam příloh .....	41



## Úvod

Železniční doprava byla vždy považována za nejekologičtější a nejlevnější způsob přepravy jak zboží tak cestujících. Vzhledem k nízkým jízdním odporům po železnici, a možnosti přepravy velkých hmotností s vyvinutím malé síly, byl tento druh dopravy rozvíjen už ve středověku, kdy se pro pohon využívala tažná zvířata. Po vynálezu parního stroje v 18. století a jeho zdokonalování bylo možno začít využívat parní stroj pro pohon lokomotiv. V 19. století byl parní stroj nejvýznamnějším zdrojem energie v průmyslu a dopravě. Pohon lokomotiv elektrickým motorem byl zkonstruován na konci 19. století. V počátcích se elektrická trakce používala pouze v městských železničních drahách.

O rozvoj elektrické trakce se na území Československa zasloužil František Křižík na začátku 20. století. V roce 1903 uvedl do provozu elektrickou dráhu z Tábora do Bechyně. F. Křižík také konstruoval elektrické tramvaje napájené z akumulátorů. Elektrizace československých železnic ve velké míře začala probíhat až po 2. světové válce.

Vzhledem k vývoji a vzrůstající potřebě některých oblastí kolejové dopravy se začaly rozvíjet akumulátorové lokomotivy pro nezávislou trakci. Jejich výhodou je čistě elektrický pohon bez dopadu na životní prostředí, nezávislost na napájení z trolejového vedení. Jejich nevýhody jsou omezená dojezdová vzdálenost a mnohem menší výkon než u elektrických lokomotiv pro závislou trakci.

Tyto vlastnosti akumulátorovou lokomotivu předurčují pro použití v podnicích a na nákladních nádražích, kde obvykle není vybudované trolejové vedení, pro posun a přepravu na kratší vzdálenosti, například v rámci podniku. Zde tento druh lokomotiv nahrazuje lokomotivy s pohonem se spalovacím motorem.

V dřívější době se akumulátorové vozy konstruovaly výhradně se stejnosměrným trakčním motorem. S technickým pokrokem a vývojem součástek je dnes možno použít pohon střídavý se střídačem sestaveným se součástkami IGBT. Takto sestavená výkonová část lokomotivy spolu s moderními způsoby řízení dokáže podstatně lépe využít omezené množství energie uložené v akumulátorech jak z hlediska použitého asynchronního motoru s daleko větší účinností než u motoru stejnosměrného, tak z hlediska typu měniče.

Tato diplomová práce se zabývá dimenzováním a technickým návrhem hlavního měniče, napěťového střídače s PWM řízením, a zpracováním technické dokumentace k tomuto měniči.

## 1. Trakční vozidla

Konstrukce trakčních vozidel je velmi různorodá a je třeba je rozdělit do několika skupin podle požadavků na ně a podmínek provozu.

Podle použití se trakční vozidla dělí do těchto skupin:

- Vozidla pro městskou hromadnou dopravu, zde patří zejména trolejbusy, tramvaje a soupravy metra.
- Železniční vozidla (běžné provedení), zde patří běžné elektrické a dieselelektrické lokomotivy určené výhradně pro tažení vlaků, tyto lokomotivy se konstruují v nejširších rozsazích výkonů a rychlostí, elektrické příměstské a regionální jednotky určené pro osobní přepravu mezi sousedními městy na kratší vzdálenosti a ve středních rychlostech.
- Rychlé soupravy, provozované na tratích vystavěných speciálně pro tyto soupravy dosahující rychlostí od 220 km/h. Jsou to ucelené soupravy konstruované do aerodynamického tvaru s vysokým výkonem rozděleným na většinu náprav.
- Speciální vozidla, do této skupiny patří vozidla spojující předešlé skupiny, např. tramvaje schopné provozu na běžných tramvajových tratích tak i na železničních tratích. Dále vozidla hybridní schopné provozu ze závislé trakce z troleje, ale i nezávislého zdroje (spalovacího motoru, baterie), lokomotivy pro důlní provoz a provoz v průmyslu a spousta jiných vozidel určených pro údržbu, opravy a řešení mimořádných událostí vzniklých na trati.

[1]

### 1.1 Napájení trakčních vozidel

Všechny trakční vozidla potřebují pro svůj pohon zdroj energie. Energie může být dodávána přes sběrací ústrojí z troleje (závislá trakce), nebo může být zdroj umístěn přímo na vozidle (nezávislá trakce).

#### 1.1.1 Závislá trakce

Závislá trakce se dále rozděluje na napájení ze stejnosměrné troleje a ze střídavé troleje.

- Stejnosměrná trolej je historicky nejstarší způsob napájení závislých trakčních vozidel. U tohoto napájení je omezená velikost hladiny napětí do 3000 V, důvodem jsou použité stejnosměrné komutátorové motory, které jsou konstrukčně řešeny na maximální napětí 1500 V, aby bylo využitelné napětí 3000 V, spojují se vždy 2 motory sériově. Tyto troleje jsou na několik hladin napětí pro různé účely:

- 600 V (750 V), použito u vozidel MHD,
- 1500 V, použito pro městské rychlodráhy a železnice,
- 3000 V, použito pro hlavní dráhy.

Zdrojem pro stejnosměrnou trolej jsou měničky obsahující diodové buďto 6-ti pulzní nebo 12-ti pulzní usměrňovače napájené z třífázové sítě 22 kV nebo 110 kV. [1]

- Střídavá trolej umožňuje použití podstatně vyššího napětí, z čehož vyplývá několik výhod:
  - Přenos vyšších výkonů,
  - snížení proudů,
  - snížení ztrát,
  - umožňuje menší hustotu napájecích stanic.

Pro střídavou trolej se používá několik napěťových soustav, které využívají skupiny států:

- 15 kV,  $16 \frac{2}{3}$  Hz, tato soustava je používána ve skandinávských zemích, ve Švýcarsku, Rakousku a Německu. Snížený kmitočet byl nutný u dříve používaných střídavých komutátorových motorů. Pro napájení této sítě bylo nutno použít rotační měniče.
- 25 kV, 50 Hz (60 Hz v USA a částečně v Japonsku), začala se rozvíjet v 60. letech 20. století se začátkem výroby křemíkových diod. [1]

### 1.1.2 Nezávislá trakce

Zdroj energie ve vozidlech pro nezávislou trakci obvykle zastává generátor poháněný spalovacím motorem, u alternátoru je výstup doplněn diodovým usměrňovačem. Další možností je trakční baterie, tato volba je však vhodnější pro nižší výkony s kratším dojezdem. Vozidla pro nezávislou trakci je možno napájet z kombinací výše uvedených zdrojů energie, takto napájené vozidla se nazývají hybridní. Výhodou bateriového zdroje energie je provoz bez exhalací a s nízkou úrovní hluku, což umožňuje využití v halách a tunelech podzemní dráhy. [1]

## 1.2 Hlavní měniče v trakčních vozidlech

V každém moderním vozidle napájeném z elektrické trakce je výkonový polovodičový měnič, který umožňuje regulaci pohonu vozidla. Tyto měniče se skládají z několika hlavních součástí:

- Polovodičové součástky. Tyto součástky slouží pro realizaci řídicích algoritmů ve výkonovém obvodu měniče. Jsou to obvykle spínací součástky vybírané podle typu měniče a jeho výkonu. Polovodičové součástky používané ve výkonových obvodech:
  - Diody – používají se v měničích k různým účelům, nejčastěji jako neřízené usměrňovací součástky.
  - Tyristory – v dnešní době používané poměrně zřídka, jsou nahrazovány modernějšími typy spínacích součástek.
  - GTO tyristory – tyto součástky ve velké míře nahradily užívání klasických tyristorů, jejich nevýhodou však je požadavek velkého výkonu řídicích obvodů, který se vyrovná spotřebě samotného GTO tyristoru. [1]
  - IGBT součástky – tento typ spínacích součástek je ve vývoji jeden z posledních. Jsou to bipolární tranzistory s izolovaným hradlem, IGBT jsou kombinací unipolárních a bipolárních tranzistorů. Výhody této struktury součástek spočívají ve velké proudové a napěťové zatížitelnosti bipolární části tranzistoru a v rychlosti zapnutí a vypnutí zajištěné unipolární strukturou v řídicí části tranzistoru. Spínání se zajišťuje nevýkonovým napěťovým signálem. IGBT součástka je při vyšší proudové zatížitelnosti vyráběna s integrovanou antiparalelní diodou, to je však při použití v napěťovém střídači žádoucí, antiparalelní diody zde tvoří zpětný usměrňovač. [2]
- Tlumivky a kondenzátory se využívají jako prvky pro akumulaci energie. Tlumivky se využívají jako filtry pro vyhlazení proudu při napájení motorů napájených z proudových střídačů, dále se používají jako součást LC filtrů a reaktory pro omezení zkratových proudů. Kondenzátory se začaly používat až s rozvojem pulzní regulace. Kondenzátory se používají jako součást filtrů, pro omezení přepětí a pro omezení nárůstu napětí.
- Nedílnou součástí měniče jsou součástky pro ochranu, měření a řízení. Pro ochranu se obvykle používají rychlé pojistky pro polovodiče nebo, pro některé spínací součástky, budící obvody. Pro měření se používají proudové a napěťové čidla a inkrementální

snímače otáček. Pro řízení se navrhují řídicí obvody s mikroprocesorovou technikou, které jsou konstruovány a programovány přímo pro požadovanou aplikaci. [1]

### **1.3 Provedení elektrických pohonů trakčních vozidel**

Provedení elektrických pohonů trakčních vozidel se dá rozdělit do několika skupin podle druhu motoru a podle způsobu řízení:

- Stupňovité řízení se stejnosměrným sériovým motorem,
- pohon se stejnosměrným cize buzeným motorem s plynulou regulací a
- pohon s asynchronním motorem s kmitočtově řízeným střídačem.

Tyto tři základní skupiny se můžou do jisté míry kombinovat, podle toho pro jakou trakci jsou určeny, jsou také vybaveny příslušnými měniči a elektrickým zařízením. [1]

#### **1.3.1 Stupňovité řízení se stejnosměrným sériovým motorem**

Stejnosemřný sériový motor je historicky první používaný trakční motor a do příchodu měničové techniky i jediným používaným motorem. Z použití stejnosměrného motoru s komutátorem vyplývá spousta potíží při provozu, důvodem je právě komutátor, kterému škodí zatěžování při nulových otáčkách, nadměrné otáčky motoru, napěťové přetěžování. Nutná je také častá údržba komutátoru a sběracího ustrojí. Další nevýhodou stejnosměrných sériových motorů je jejich nízká účinnost, tyto motory způsobují významné procento ztrát na vozidle. Ztráty v motoru způsobují oteplení stroje, které je nutné odvést do okolí výkonným chlazením. [3]

Řízení otáček je u těchto pohonů prováděno tzv. stupňovitým řízením. Řízení probíhá přepínáním odboček předřadného odporu a tím snižování napětí v kotvě motoru. Tato regulace je neekonomická, ztráty, které při sníženém napětí nevznikají v motoru, vznikají v předřadném odporu. Pro jednotlivé aplikace bylo vyvinuto spousta konstrukčních řešení od vozidel MHD až po lokomotivy vysokých výkonů. [3]

Tyto typy trakčních vozidel byly konstruovány pro stejnosměrnou trakci, aby byla možnost provozu i na střídavé trakci, musel být systém doplněn o vstupní diodový usměrňovač, který přeměňoval střídavou energii na stejnosměrnou s malou střídavou složkou. [3]

#### **1.3.2 Pohon se stejnosměrným cize buzeným motorem s plynulou regulací**

Koncepce pohonu s cize buzeným motorem je prvním ideálním zdrojem regulovaného točivého momentu. U tohoto pohonu je možno odděleně regulovat moment a otáčky motoru, to však předpokládá dva regulované zdroje napětí pro napájení kotvy a budícího vinutí. Rozvoj

těchto pohonů pro aplikace v trakčních vozidlech začal s rozvojem tyristorů pro výkonovou elektroniku. U těchto typů pohonů se zároveň začala ve velké míře prosazovat a rozvíjet řídicí elektronika. [4]

Pro možnost plynulé změny napětí pro napájení stejnosměrného motoru s cizím buzením jsou na vozidle nutné pulzní měniče, ty se používají pro regulaci proudu, napětí nebo výkonu v odporníku pro maření přebytečné energie. Pulzní měniče jsou v několika základních konstrukčních provedeních, jako snižovací měnič, zvyšovací měnič a pulzně proměnný odpor, některé tyto provedení se dají kombinovat, pro získání vhodného akčního členu např. pro napájení motoru kombinace snižovacího a zvyšovacího měniče, který umožňuje napájení motoru od nulového napětí až po provoz při rekuperaci. [4]

Pulzní měniče se musí konstruovat podle požadavků aplikace (výkonu, napětí). Při konstrukci se musí brát ohledy na jeho vlastnosti. Pulzní měniče musí snášet hodnoty maximálního opakovatelného závěrného napětí součástek. Zde je nutné vybrat součástky odpovídající zvolené hladině napětí. Z výkonu, na jaký je měnič konstruován, vyplývají výkonové ztráty způsobené přenosem výkonu přes spínací součástky. Na součástkách vzniká určitá výkonová ztráta přeměňovaná v teplo, které je nutno odvést do okolí a zabránit ohřátí spínacích součástek nad určitou mez a tím je zničit. [4]

Při napájení vozidla ze střídavé trakční sítě se nevyužívají pulzní měniče, ale řízené tyristorové usměrňovače. Řízené usměrňovače však mají výrazné zpětné vlivy na síť, což zhoršuje energetické vlastnosti a jsou zdrojem výrazného rušení v širokém pásmu frekvencí. Tyto špatné vlastnosti řízených usměrňovačů vedly k velmi omezené míře použití. Nejvhodnější využití řízeného usměrňovače představuje napájení proudových střídačů pro asynchronní trakční motory. [4]

### **1.3.3 Pohon s asynchronním motorem s kmitočtově řízeným střídačem**

Pro pohon trakčních vozidel vývoj a konstrukce směřuje do koncepce pohonu s asynchronním motorem s kmitočtovým řízením. Tato koncepce se v moderních vozidlech používá v mnoha provedeních a pro všechny druhy trakce. Použití asynchronního motoru s kotvou nakrátko představuje spoustu výhod díky jeho vysoké spolehlivosti a minimální nutnosti údržby. V dřívější době bránilo jeho využití to, že neexistoval hospodárný způsob pro jeho plynulou regulaci otáček. Způsoby řízení asynchronních motorů se začaly rozvíjet až v poměrně nedávné době s rozvojem moderních spínacích výkonových součástek, kterými je umožněno regulovat frekvenci zároveň s regulací napětí. V pohonech se střídavým

kmitočtovým řízením se v menší míře také uplatňují synchronní motory s cizím buzením, ty však vyžadují složitější systém řízení se zdrojem pro napájení budícího vinutí. Tento problém však může vyřešit použití synchronního motoru s permanentními magnety, ovšem kvalitní magnetické materiály ze vzácných zemin jsou v dnešní době velice drahé. [5]

Asynchronní trakční motor napájený ze střídače s IGBT součástkami vyžaduje konstrukční úpravy proti běžným motorům napájených přímo ze sítě. Při napájení motoru ze střídače je izolace motoru zatěžována velkými strmosti nárůstu napětí, to vyžaduje použití speciálních izolačních materiálů. Dále se v napájení motoru objevuje široké spektrum harmonických složek, pro vysoké frekvence se vytváří u mechanických částí motoru (ložiska) kapacitní vazby. Kapacitními vazbami vznikají napětí mezi rotorem a vinutím statoru, vzniklé napětí negativně ovlivňuje mazivo ložisek a způsobuje degradaci samotných ložisek. Řešením tohoto problému je použití ložisek s keramickými valivými tělesy nebo vzájemným elektrostatickým stíněním rotoru a statoru. [5]

Pro napájení asynchronních trakčních motorů se používají proudové i napětíové střídače. Dříve byly používány hlavně proudové střídače z důvodu využití tyristorů a to jen pro menší výkony do vozidel MHD, s příchodem vypínatelných součástek se však rozšířily napětíové střídače používané v širokém spektru výkonů od vozidel MHD až po nejvýkonnější lokomotivy. Vlastnosti motoru napájeného ze střídače je dán především regulací, motor pracuje ve stabilní oblasti momentové charakteristiky díky frekvenčnímu řízení a reverzace je prováděna řízením sledu fází. Napájení motoru ze střídače způsobuje zvýšení ztrát v motoru a zvlnění momentu v důsledku odchylek proudu od základní harmonické. [5]

Motor lze provozovat s určitými omezeními. Omezení výkonu je dáno oteplováním motoru, toto omezení se dá snížit použitím izolačních materiálů vyšší teplotní třídy a použitím výkonnějšího chlazení motoru. Dalším omezením je omezení na konstrukčních částech motoru. Dovolené otáčky motoru, zatížení a životnost ložisek způsobují omezení otáček motoru a problémy s přenosem momentu na nápravu. Překračování těchto omezení výrazně snižuje životnost motoru a musí se dodržovat. [5]

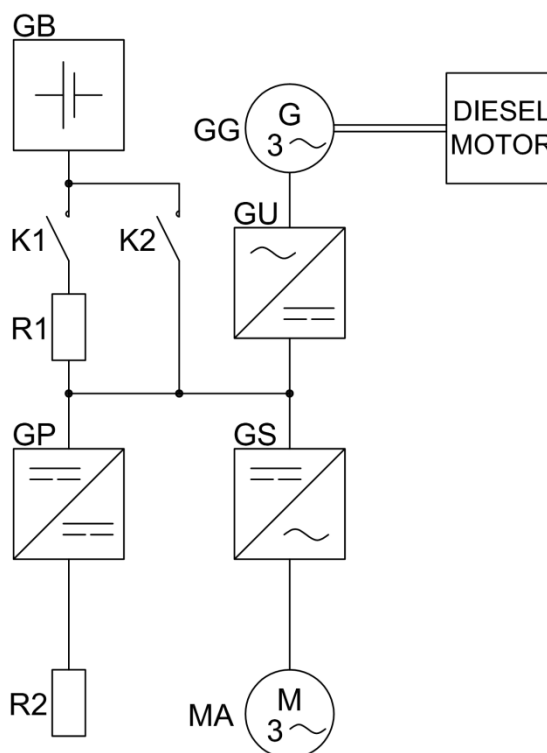
Podle použitého střídače (napětíový nebo proudový) je nutné navrhnout vstupní obvody. Pro napětíový střídač je nutno vytvořit pokud možno ideální napětíový zdroj. Vytvoření napětíového zdroje je podstatně jednodušší než zdroje proudového. Síť, generátor nebo baterie mají charakter napětíového zdroje, zde stačí jen podle zdroje vytvořit vstupní obvod pro střídavé napájení neřízeným diodovým usměrňovačem nebo pulzním usměrňovačem a meziobvodem

s LC filtrem, při napájení ze stejnosměrné sítě je nutný LC filtr který dostatečně odděluje stejnosměrný meziobvod od sítě (nezpůsobuje rušení např. zabezpečovacího drážního zařízení). Při napájení pohonu z baterie postačuje pro meziobvod kondenzátor. Tento kondenzátor však musí zajistit, aby nevznikalo příliš velké zvlnění napětí v meziobvodu. Proudový meziobvod je nutné vždy vytvořit pomocí pulzního měniče nebo řízeného usměrňovače (při napájení ze střídavého zdroje) s vyhlazovací tlumivkou, protože je nutno pomocí těchto měničů regulovat proud v meziobvodu. Použitím těchto měničů jsou pohony s proudovými střídači složitější jak ve výkonovém obvodu, tak v obvodech regulačních. [5]

### ***Možnosti pohonů vozidel pro nezávislou trakci***

Tato práce je zaměřená na návrh měniče pro nezávislou trakci, proto jsou v následující části uvedeny pouze možnosti pohonu elektrické lokomotivy pro nezávislou trakci.

Hybridní pohon elektrické lokomotivy pro nezávislou trakci s asynchronním motorem a kmitočtovým řízením. Zdroj je tvořen trakční akumulátorovou baterií a soustrojím s dieselovým motorem a generátorem. Střídavá elektrická energie z generátoru je usměrněna usměrňovačem a připojena na stejnosměrný meziobvod.



Obr. 1.1: Přehledové schéma pohonu hybridní elektrické lokomotivy

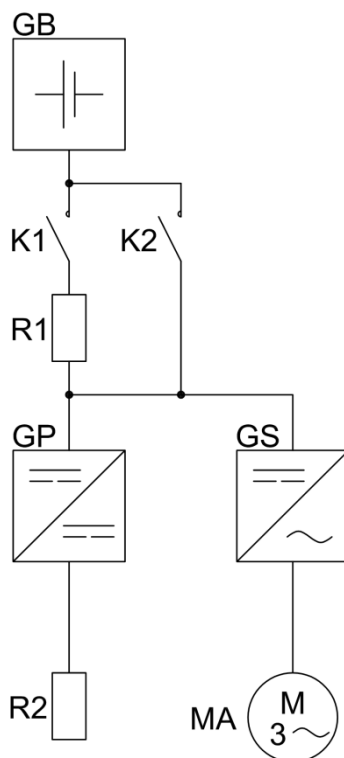


Popis obrázku 1.1:

- GB – trakční akumulátorová baterie
- GG, diesel motor – soustrojí s generátorem
- GU – usměrňovač
- K1, K2, R1 – soustava pro nabití a připojení stejnosměrného meziobvodu
- GS, MA – soustava pohonu
- GP, R2 – brzdná jednotka pro maření přebytečné energie

Připojení baterie na meziobvod je doplněno rezistorem pro omezení proudů při nabíjení meziobvodu. Pro možnost elektrodynamického brzdění je na stejnosměrný meziobvod připojena nezávislá brzdná jednotka, řízená napětím meziobvodu, která začne působit, když baterie spolu s kapacitou meziobvodu nedokáže pojmout brzdnou energii.

Pohon elektrické lokomotivy pro nezávislou trakci s napájením z baterie. Tento pohon je napájen pouze trakční akumulátorovou baterií. Zdroj je nutné po vyčerpání energie nabít ze sítě. Provedení zbylých částí je obdobou hybridní lokomotivy.



Obr. 1.2: Přehledové schéma pohonu elektrické lokomotivy napájené z baterie

Popis obrázku 1.2:

- GB – trakční akumulátorová baterie,
- K1, K2, R1 – soustava pro nabití a připojení stejnosměrného meziobvodu,
- GS, MA – soustava pohonu,
- GP, R2 – brzdná jednotka pro maření přebytečné energie.

### **1.4 Specifikace elektrické lokomotivy pro nezávislou trakci**

Z výše uvedených možností konstrukce trakčních vozidel vyplývá takto specifikovaná lokomotiva. Posunovací akumulátorová lokomotiva se řadí do skupiny speciálních vozidel. Je konstruována pro nezávislou trakci a napájena z trakční akumulátorové baterie o jmenovitém napětí 800 V. Hlavní měnič tvořící nejvýznamnější část elektrovýstroje je tvořen IGBT moduly s napětovým meziobvodem tvořen kondenzátorovou baterií. Elektrický pohon této lokomotivy je tvořen asynchronním motorem s kmitočtově řízeným střídačem. Výkon lokomotivy je 300 kW.

Trakční asynchronní motor je šestipólový, dvouložiskový, uzavřený s kotvou nakrátko a s cizí ventilací. Tento motor je určen pro pohon železničních vozidel. Je na napětí 400 V a proud 530 A, jeho jmenovitá frekvence je 53 Hz, jmenovitý moment je 2760 Nm a maximální moment je 5509 Nm, maximální otáčky jsou stanoveny na  $3400 \text{ min}^{-1}$  a jeho účinnost je 94 %. Provedení trakčního pohonu této lokomotivy je uveden na obrázku 1.2.

Na takto specifikovanou lokomotivu je v této práci navržen napětový střídač osazený výkonovými IGBT bezpotenciálovými moduly s vodním chlazením.

## 2. Dimenzování hlavního měniče

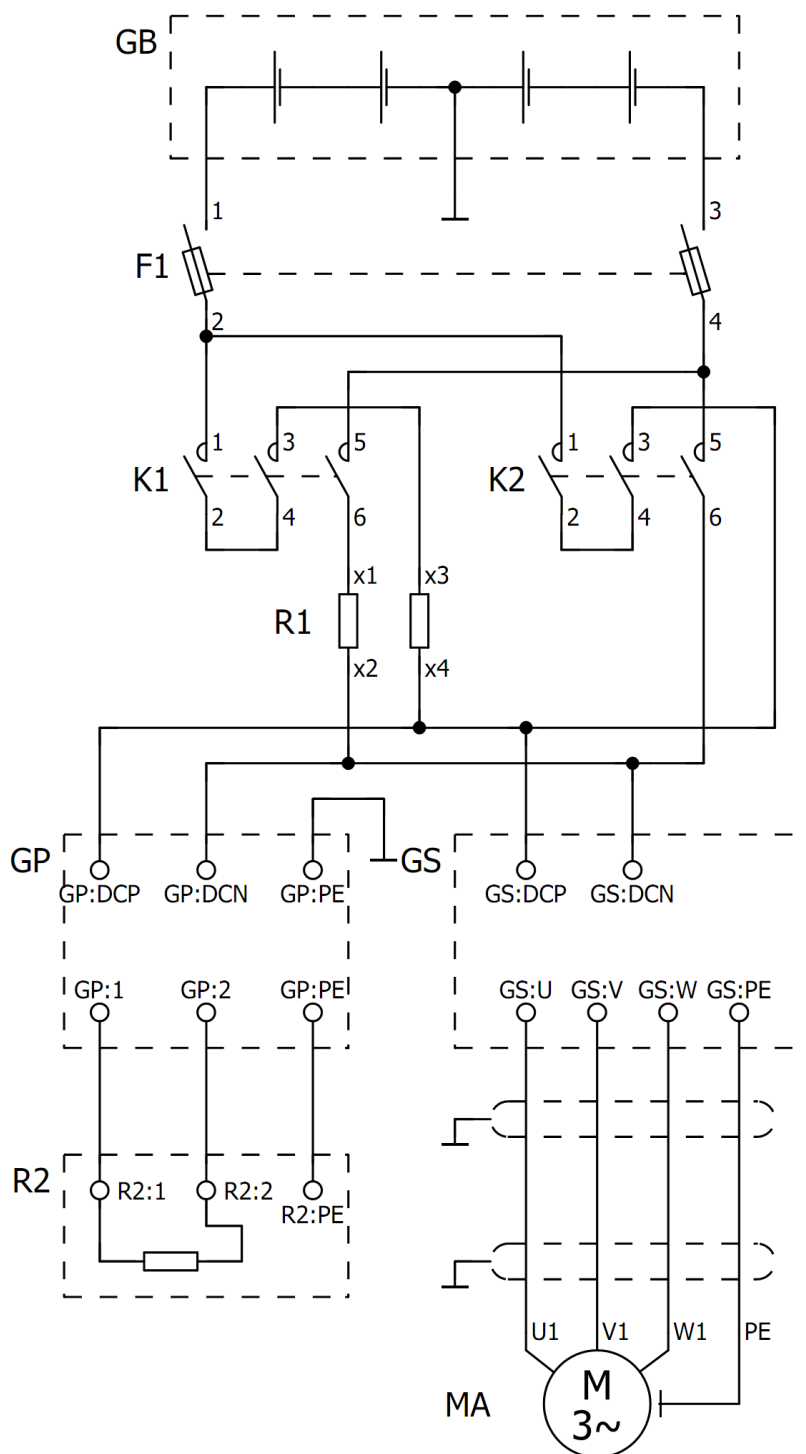
Hlavní měnič pro akumulátorovou lokomotivu je napájen z trakční akumulátorové baterie. Tato baterie má jmenovité napětí 800 V a maximální hodnota napětí může dosahovat až 1000 V. Na výstupu je připojen asynchronní motor s kotvou na krátko, parametry tohoto motoru jsou uvedeny v předchozí kapitole. Z toho vyplývá, že jako hlavní měnič pro kumulátorovou lokomotivu je nutný střídač. V této části práce je nutné zvolit vstupní a výstupní parametry střídače a požadavky na jeho provoz, tak aby mohlo být navrženo celkové řešení střídače.

Střídač je dimenzován na chod motoru S1, tedy stálý chod při jmenovitém výkonu. Střídač bude umístěn v rozvaděči přístupném pouze kvalifikovaným osobám a uzamčen, proto je zvoleno krytí proti vniknutí cizího tělesa a proti vniknutí vody IP00. Měnič bude umístěn na kolejovém vozidle a musí splňovat požadavky technických norem pro drážní zařízení, zároveň musí splňovat požadavky elektrotechnických norem, tam kde nejsou požadavky drážních norem vyšší. Elektrotechnické normy jsou v tomto případě podřízené normám o drážních zařízeních.

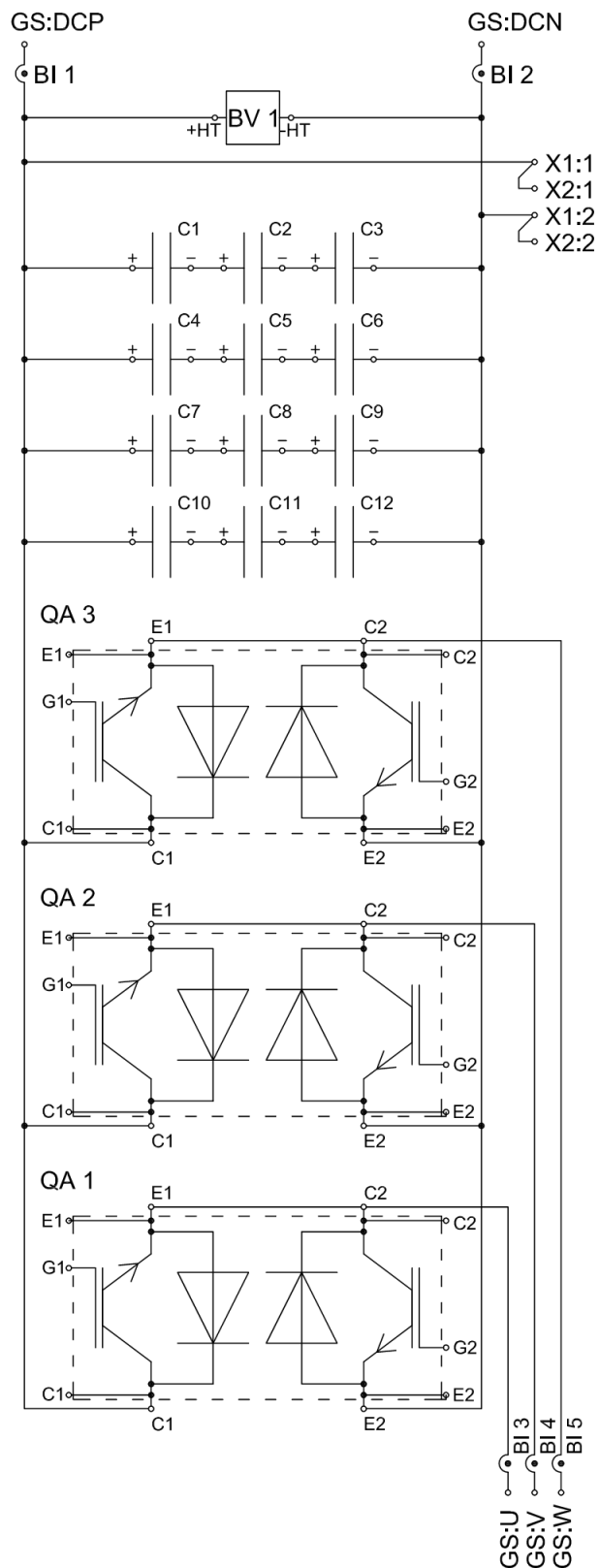
Výstupní typový proud	A	530
Výstupní typový výkon (53 Hz 400 V)	kW	367
Vstupní proud	A	432
Napětí:		
- napájení elektronických obvodů	V	$\pm 24$
- napájení výkonové části	V	$720 \div 1000$
- výstupní napětí	V	$0 \div 400$
- kapacita DC obvodu	$\mu\text{F}$	9066
Spínací frekvence	kHz	6
Max. spínací frekvence s omezením výkonu	kHz	8
Metoda chlazení	Kapalinové chlazení s integrovaným hliníkovým chladičem	
Max. teplota chladicí kapaliny	$^{\circ}\text{C}$	40
Min. průtok kapaliny chladičím systémem	l/min	16
Stupeň krytí		IP00

Tab. 2.1: Parametry střídače

## 3. Návrh elektrických schémat

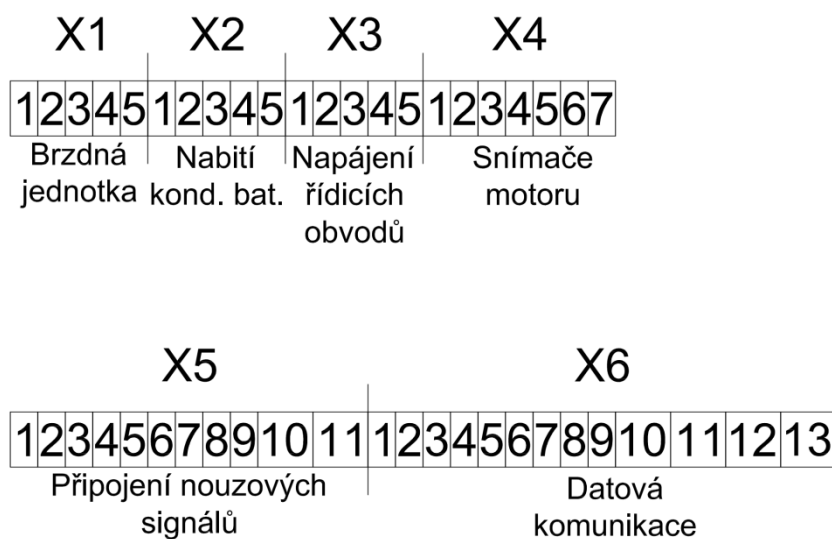


Obr. 3.1: Schéma výkonové části pohonu lokomotivy



Obr. 3.2: Obvodové schéma výkonové části střídače

Ve schématu na obr. 3.2 jsou znázorněny hlavní připojovací svorky střídače. Svorky GS:DCP a GS:DCN jsou určeny pro připojení na hlavní stejnosměrnou výkonovou sběrnici, která slouží pro napájení všech pohonů a jiných spotřebičů na vozidle. Svorky GS:U, GS:V a GS:W jsou určeny pro připojení motoru hlavního pohonu vozidla, je na nich vektorově řízené 3 fázové napětí. Svorky 1 a 2 na svorkovnici X1 jsou určeny pro připojení brzdného odporu pro regulaci napětí ve stejnosměrném obvodu. Svorky 1 a 2 na svorkovnici X2 slouží pro nabití kondenzátorové baterie ve stejnosměrném obvodu před připojením trakční akumulátorové baterie GB.



Obr. 3.3: Použití jednotlivých svorkovnic

Na obr. 3.3 jsou znázorněny svorkovnice pro připojení externích funkčních celků a snímačů. Svorkovnice X1 slouží pro připojení brzdné jednotky (pulzně regulovaného odporu). Svorkovnice X2 slouží pro nabití kondenzátorové baterie, umístěné v DC obvodu, z proudově omezeného zdroje. Tím je zajištěno, aby nedošlo k velkým proudovým špičkám a nevhodnému namáhání velkými proudy kondenzátorové baterie při přímém připojení hlavnímu napájení střídače. Svorkovnice X3 slouží pro připojení napájení malým napětím. Připojení tohoto zdroje je pro napájení řídicích obvodů a proudových a napěťových snímačů. Svorkovnice X4 slouží pro připojení signálů ze snímačů umístěných v motoru napájeného ze střídače (snímání otáček a teploty motoru). Svorkovnice X5 slouží pro připojení nouzového tlačítka a dalších případných nouzových signálů na vozidle pro okamžité bezpečné odstavení vozidla z provozu. Svorkovnice X6 slouží pro připojení komunikačního rozhraní pro zadávání povelů měniči a čtení důležitých dat pro provoz vozidla.

## 4. Výběr komponent a návrh 3D modelu napěťového střídače

### 4.1 Dimenzování komponent napěťového střídače

Pro správné dimenzování komponent je nutné zvolit a vypočítat několik parametrů, podle kterých jsou vybírány a navrhovány komponenty střídače. Dále v návaznosti na vybrané komponenty je nutné z jejich parametrů spočítat a vybrat chlazení pro hlavní spínací prvky ve výkonovém obvodu.

#### 4.1.1 Napěťové dimenzování

Napěťové dimenzování je nutné z hlediska použitých izolačních materiálů a izolačních vzdáleností mezi jednotlivými živými částmi střídače.

Nejvyšší diferenční napětí je ve střídači dáno vstupním napájecím napětím, tedy 800 V DC. Toto napětí může vzrůst, až na hodnotu 1000 V. Jmenovité izolační napětí je zvoleno 6 kV.

Na tyto hodnoty jsou vyhledány v ČSN EN 50124-1 o drážních zařízeních a koordinaci izolace u těchto zařízení izolační vzdálenosti. Podle normy je zvolen stupeň znečištění PD 2, které určuje prostředí s řídkou, krátkodobou a občasnou kondenzací a občasnou vodivostí způsobenou kondenzací. Z dalších tabulek je určena vzdušná izolační vzdálenost 5,5 mm a povrchová izolační vzdálenost 30 mm pro materiálovou skupinu I.

#### 4.1.2 Proudové dimenzování

Proudové dimenzování je nutné z hlediska proudové zatížitelnosti zvolených vodičů a jejich oteplování. Pro určení minimálního průřezu vodiče je nutno znát proud procházející vodiči a maximální proudovou hustotu, ta je zvolena  $J = 3 \text{ Amm}^2$ .

Proudové dimenzování je rozděleno pro dvě hlavní části střídače, vstupní část (DC obvod) a výstupní část (AC obvod). Pro výstupní část je proud procházející vodiči určen zátěží, tedy trakčním asynchronním motorem se jmenovitým proudem 530 A, výstupní proud  $I_{AC} = 530 \text{ A}$ . Pro vstupní část střídače je nutno proud vypočítat s pomocí výkonu střídače. Výkon střídače je 367 kW.

Část proudu procházejícího vstupními vodiči tvoří i ztráty na spínacích součástkách. Je nutné určit příkon střídače. Ztráty na spínacích součástkách dosahují cca  $\Delta P_Z$  8 kW. Příkon tedy je:

$$P_1 = P_2 + \Delta P_Z = 367 + 8 = 375 \text{ kW} \quad (4.1)$$

#### 4. Výběr komponent a návrh 3D modelu napěťového střídače

Proud je dán podílem příkonu a napětí na DC svorkách. Napětí na DC svorkách odpovídá jmenovitému napětím trakční baterie 800 V. Proud vstupními vodiči je:

$$I_{DC} = \frac{P_1}{U_{DC}} = \frac{375 \cdot 10^3}{800} = 468 A \quad (4.2)$$

Maximální proudová hustota vodiči byla zvolena  $J = 3 \text{ Amm}^2$ . Nyní je možno vyjádřit minimální průřezy vodiče pro DC a AC obvod:

$$J = \frac{I}{S} \rightarrow S = \frac{I}{J} \quad (4.3)$$

$$S_{DC} = \frac{I_{DC}}{J} = \frac{468}{3} = 156 \text{ mm}^2 \quad (4.4)$$

$$S_{AC} = \frac{I_{AC}}{J} = \frac{530}{3} = 176,6 \text{ mm}^2 \quad (4.5)$$

#### 4.2 Výběr komponent napěťového střídače

Komponenty použité v měniči pro lokomotivy provozované na drahách musí splňovat požadavky norem o drážních zařízeních a norem navazujících.

##### Vodiče

Jako výkonové vodiče jsou ve střídači použity elektrovedné měděné plechy, které splňují požadavky proudového dimenzování z kapitoly 4.1.2. Mezi vodiči, tedy živými částmi střídače, je dodržována izolace na hodnotu izolačního napětí 6 kV dle napěťového dimenzování v kapitole 4.1.1. Pevnou izolaci mezi vodiči tvoří elektroizolační fólie Valox FR1 o tloušťce 0,125 mm a elektroizolační materiál EPM 203.

##### IGBT moduly

IGBT moduly jsou vybrány s ohledem na mezní hodnoty napětí a proudu. Mezní hodnotu napětí určuje parametr součástky – maximální blokovací napětí  $U_{CES}$  a je dána napětím na vstupu střídače (napájecím napětím). Mezní hodnotu proudu určují parametry součástky – stejnosměrný kolektorový proud  $I_{C \text{ nom}}$  a opakovatelný špičkový kolektorový proud  $I_{C \text{ RM}}$ , tyto proudy jsou dány funkcí střídače a zátěží.

Nejvyšší hodnoty napětí na vstupu střídače se dosahuje při elektrodynamickém brzdění lokomotivy, tato hodnota dosahuje cca 1000 V. IGBT modul je vybrán na napětí  $U_{CES} = 1700 \text{ V}$ .



#### 4. Výběr komponent a návrh 3D modelu napěťového střídače

Stejnoseměrný kolektorový proud je dán střední hodnotou proudu procházejícího IGBT modulem. Tato hodnota je po rozdělení proudu mezi dva tranzistory v jedné větvi (jedna fáze) a zpětné diody přibližně čtvrtinová oproti střední hodnotě proudu procházejícího celým IGBT modulem. Proto je tranzistor dimenzován na opakovatelný špičkový kolektorový proud. Tento proud je dán fázovým proudem odebíraný zátěží. Maximální proud odebíraný zátěží je vypočítán pomocí zjednodušeného vztahu mezi efektivní a maximální hodnotou sinusového průběhu:

$$I_M = I \cdot \sqrt{2} \quad (4.6)$$

Při dosazení efektivního proudu motoru  $I = 530 \text{ A}$  do vzorce 6 bude maximální hodnota proudu:

$$I_M = 530 \cdot \sqrt{2} = 750 \text{ A} \quad (4.7)$$

Opakovatelný špičkový kolektorový proud bude minimálně s ohledem na výkonovou rezervu měniče  $1000 \text{ A}$ .

Vybraný IGBT modul: Infineon FF800R17KP4\_B2 se dvěma tranzistory a antiparalelními diodami v jednom modulu, se základními parametry  $U_{CES} = 1700 \text{ V}$ ,  $I_{C \text{ nom}} = 800 \text{ A}$  a  $I_{C \text{ RM}} = 1600 \text{ A}$ .

Maximální hodnoty				
Blokovací napětí		$U_{CES}$	1700	V
Stejnoseměrný kolektorový proud		$I_{C \text{ nom}}$	800	A
		$I_C$	1200	A
Opakovatelný špičkový kolektorový proud		$I_{C \text{ RM}}$	1600	A
Špičkové napětí mezi hradlem a emitorem		$U_{GE}$	$\pm 20$	V
Charakteristické hodnoty				
Saturační napětí mezi kolektorem a emitorem tranzistoru	$I_C = 800 \text{ A}$ , $U_{GE} = 15 \text{ V}$ , $T_j = 125 \text{ }^\circ\text{C}$	$U_{CE \text{ sat}}$	2,3	V
Zapínací doba	$I_C = 800 \text{ A}$ , $U_{CE} = 900 \text{ V}$ , $U_{GE} = \pm 15 \text{ V}$ , $R_{Gon} = 0,8 \text{ } \Omega$ , $T_j = 125 \text{ }^\circ\text{C}$	$t_{d \text{ on}}$	0,63	$\mu\text{s}$
Vypínací doba	$I_C = 800 \text{ A}$ , $U_{CE} = 900 \text{ V}$ , $U_{GE} = \pm 15 \text{ V}$ , $R_{Goff} = 1,8 \text{ } \Omega$ , $T_j = 125 \text{ }^\circ\text{C}$	$t_{d \text{ off}}$	1,15	$\mu\text{s}$

Tab. 4.1: Důležité parametry IGBT modulu

[6]

### Kondenzátory vstupního obvodu

Kondenzátorová baterie na vstupu střídače slouží k rychlé výměně jalové energie mezi vstupním a výstupním obvodem při komutaci spínacích součástek a pro částečnou akumulaci brzděné energie při elektromagnetickém brzdění. Celková hodnota kondenzátorové baterie je zvolena na 9 mF. Kapacita kondenzátorové baterie byla zvolena na základě zkušeností s konstrukcí polovodičových měničů na katedře elektroniky VŠB-TU Ostrava a podle katalogových údajů pro střídače stejného typu a pro stejný účel. Kondenzátorová baterie je připojená na napětí 800 V, při provozu pohonu může napětí vzrůst až na hodnotu 1060 V, při dimenzování je nutno brát v úvahu nejvyšší hodnotu.

Jsou vybrány hliníkové elektrolytické kondenzátory vhodné pro aplikaci ve výkonové elektronice (v napájecích zdrojích, střídačích a filtrech). U kondenzátorů je nutné dbát na rozsah pracovních teplot v návaznosti na normy pro trakční zařízení. Ve stejnosměrném obvodu je navržena kondenzátorová baterie v sérioparalelním řazení (série – pro zvýšení napěťové zatížitelnosti, paralelní řazení – pro docílení požadované kapacity). Do série jsou řazeny 3 kondenzátory, pro zlepšení rozdělení napětí na jednotlivé kondenzátory je možno připojit paralelně ke každému kondenzátoru balancovací rezistor 9 k $\Omega$ . Kondenzátory jsou vybrány od výrobce Kendeil s označením K01500682--M0J214.

Jmenovitá kapacita	6800	$\mu$ F	při 100 Hz
Tolerance	$\pm 20$	%	
Teplotní rozsah	-40 ÷ 85	$^{\circ}$ C	
Jmenovité napětí	500	V	DC
Přepětí	525	V	DC
Maximální zvlněný proud	20,2	A	rms při 85 $^{\circ}$ C
Životnost	12000	hod.	při 85 $^{\circ}$ C

Tab. 4.2: Základní parametry kondenzátoru

[7]

### Snímače napětí a proudu

Snímače napětí a proudu jsou vybrány od výrobce LEM, který vyrábí snímače pro trakci splňující požadavky norem o trakčních zařízeních. Snímače jsou vybrány s ohledem na rozsah měřených veličin. U proudových snímačů s halovou sondou je nutné měřit proudy v rozsahu od 0 A do cca 600 A. Napěťovým snímačem je nutné měřit napětí v DC obvodu, které je v rozmezí hodnot cca od 700 V do 1100 V. Pro tyto požadavky jsou vybrány snímače pro měření proudu s typovým označením LTC 600 a pro měření napětí s typovým označením AV 100-1000.

#### 4. Výběr komponent a návrh 3D modelu napěťového střídače

Nominální primární proud RMS	$I_{PN}$	500	A
Primární proud, měřicí rozsah 24 V	$I_P$	$0 \div \pm 1500$	A
Nominální sekundární proud RMS	$I_{SN}$	100	mA
Převodní konstanta	$K_N$	1 : 5000	
Napájecí napětí ( $\pm 5\%$ )	$U_C$	$\pm 15 \div 24$	V

Tab. 4.2: Základní parametry snímače LTC 600

Nominální primární napětí RMS	$U_{PN}$	1000	V
Primární napětí, měřicí rozsah	$U_{PM}$	$0 \div \pm 1500$	V
Nominální sekundární proud RMS	$I_{SN}$	50	mA
Napájecí napětí ( $\pm 5\%$ )	$U_C$	$\pm 12 \div 24$	V

Tab. 4.3: Základní parametry snímače AV 100-1000

[8][9]

#### Tepelné ochrany

Pro ochranu IGBT modulů proti přehřátí jsou na chladiče umístěna tepelná relé, která při překročení mezní teploty rozpojí kontrolní obvod a tím předají signál o překročení mezní teploty chladiče řídicímu systému. Mezní teplota je zvolena na 90 °C. Tepelná relé jsou vybrána od výrobce SANG MAO s označením B-1002B. Relé mají příložnou konstrukci a jsou umístěny v místě, kde protéká chladičem nejvíce ohřátá chladicí kapalina.

#### Svorkovnice

Svorkovnice jsou vybrány od výrobce WAGO, je zvolena řada řadových svorkovnic TOPJOB S – 200x (x = 0 – 3 podle jmenovitého průřezu vodiče). Tyto svorkovnice jsou upevněny na DIN liště o šířce 35 mm.

Číslo svorky	Průřezy vodiče	Jmenovité napětí	Odolnost proti přepětí	Proudová zatížitelnost
	mm <sup>2</sup>	V	kV	A
2000	0,14 ÷ 1,5	800	6	18
2001	0,25 ÷ 2,5	800	8	24
2002	0,25 ÷ 4	800	8	32
2004	0,5 ÷ 6	800	8	41

Tab. 4.4: Přehled parametrů použitých svorek

[10]

##### **Další konstrukční prvky**

Celková konstrukce střídače je tvořena ohýbanými nerezovými plechy o tloušťkách 4 a 1 mm. Plechy jsou spojovány šroubovými spoji, svařováním a bodováním. Jednotlivé plechové díly jsou rozkresleny v příložené výkresové dokumentaci.

Pro izolační konstrukční díly je vybrán materiál EPM 203 od dodavatele Labara zabývající se strojním opracováním elektroizolačních materiálů. Materiál EPM 203 je tvořen skelnou rohoží a epoxidovou pryskyřicí a vyznačuje se vysokou mechanickou odolností, výbornými elektroizolačními vlastnostmi a vysokou odolností proti teplu.

Dále je v konstrukčních prvcích ve velké míře zahrnut spojovací materiál. Ten je však popsán u jednotlivých dílů střídače pro každou skupinu spojů v příložené výkresové dokumentaci.

### 4.3 Návrh chladičského systému

#### 4.3.1 Výpočet ztrátového výkonu IGBT modulů

Pro výpočet ztrátového výkonu střídače, respektive jeho spínacích součástek, je nutné znát základní parametry střídače (napájecí napětí, vstupní proud a spínací frekvenci). Dále je nutné určit parametry IGBT modulů, které určují ztráty vedením a ztráty spínací. Tyto parametry je nutné odečíst z grafů obsažených v datovém listu součástky pro příslušnou úroveň provozu střídače.

Napájecí napětí je dáno napájením z trakční akumulátorové baterie, jejíž jmenovitá hodnota je 800 V. Vstupní proud střídače je vypočítán v rovnicích 4.1 a 4.2 v kapitole 4.1.2, jeho hodnota je 468 A. Spínací frekvence střídače je zvolena na 6 kHz.

Vstupní napětí		$U_{DC}$	800	V
Vstupní proud		$I_{DC}$	468	A
Spínací frekvence		$f_s$	6	kHz
Dynamický odpor v sepnutém stavu		$R_{CE}$	0,33	mΩ
Saturační napětí mezi kolektorem a emitorem	$I_C = 470 \text{ A}, U_{GE} = 15 \text{ V}, T_j = 125 \text{ °C}$	$U_{CE}$	1,8	V
Zapínací doba	$I_C = 800 \text{ A}, U_{CE} = 900 \text{ V}, U_{GE} = \pm 15 \text{ V}, R_{Gon} = 0,8 \text{ Ω}, T_j = 125 \text{ °C}$	$t_{don}$	0,63	μs
Vypínací doba	$I_C = 800 \text{ A}, U_{CE} = 900 \text{ V}, U_{GE} = \pm 15 \text{ V}, R_{Goff} = 1,8 \text{ Ω}, T_j = 125 \text{ °C}$	$t_{doff}$	1,15	μs

Tab. 4.5: Parametry střídače a IGBT modulů pro výpočet ztrátového výkonu

Vzorec pro výpočet ztrátového výkonu pulzního střídače:

$$\Delta P_Z = 2 \cdot (U_{CE} \cdot I_{DC} + I_{DC}^2 \cdot R_{CE}) \cdot \left( \frac{-t_{don} - t_{doff} + \frac{1}{f_s}}{\frac{1}{f_s}} \right) + f_s \cdot \frac{3}{2} \cdot U_{DC} \cdot I_{DC} \cdot (t_{don} + t_{doff}) \quad (4.8)$$

Po dosazení do vzorce 4.8 parametrů z tabulky 4.5 je zjištěn výsledný ztrátový výkon:

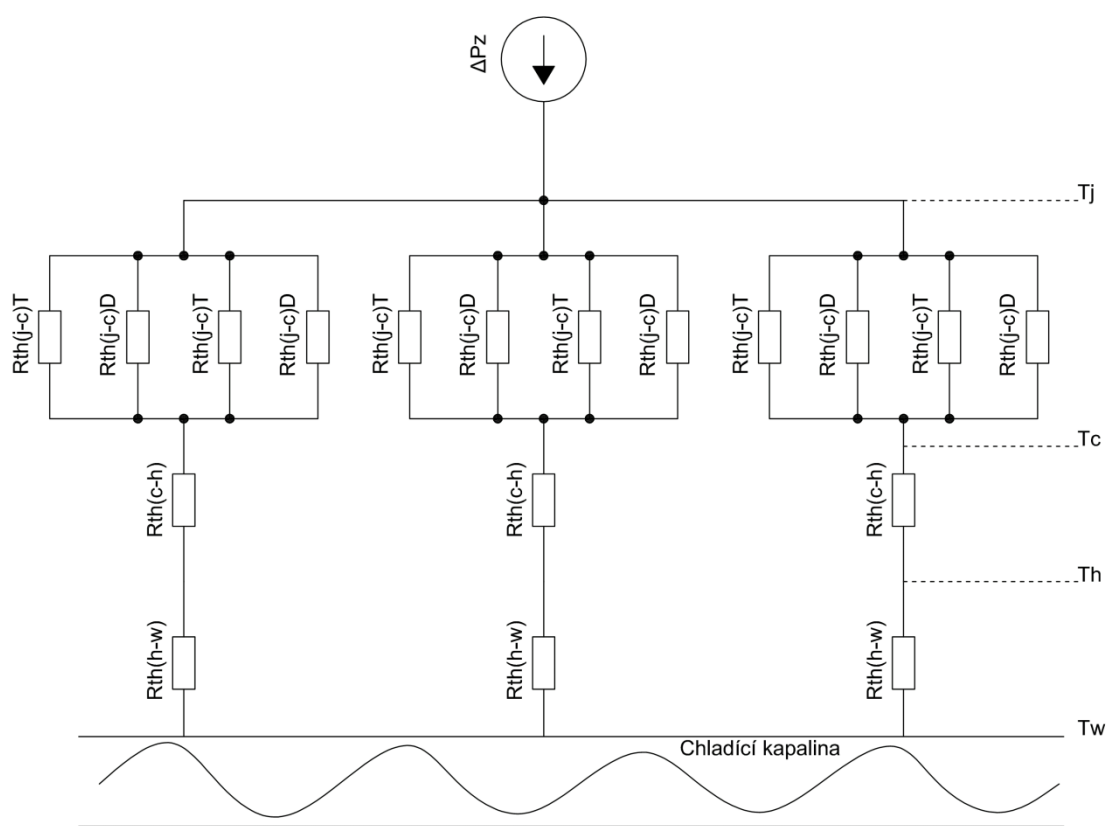
$$\Delta P_Z = 2 \cdot (1,8 \cdot 468 + 468^2 \cdot 0,33 \cdot 10^{-3}) \cdot \left( \frac{-0,63 \cdot 10^{-6} - 1,15 \cdot 10^{-6} + \frac{1}{6000}}{\frac{1}{6000}} \right) + 6000 \cdot \frac{3}{2} \cdot 800 \cdot 468 \cdot (0,63 \cdot 10^{-6} + 1,15 \cdot 10^{-6}) = 7807,7 \text{ W} \quad (4.9)$$

[11]

### 4.3.2 Návrh chladicího obvodu

Pro chlazení je zvolen vodní chladič od výrobce Semikron WP 16/180 s teplotním odporem při průtoku kapaliny 8l/min  $R_{TH(h-w)} = 0,015 \text{ K/W}$ . Na každém chladiči bude umístěn jeden výkonový IGBT modul, chladiče budou spojeny paralelním přívodem chladicí kapaliny.

Na kontaktní plochu chladiče a modulu bude nanесena teplovodná páska pro snížení přechodového teplotního odporu ALF 5 s teplotním odporem  $R_{TH(c-h)} = 0,009 \text{ K/W}$  na palec čtvereční. Kontaktní plocha součástky je 26,155 palce čtverečního. Při této ploše je teplotní odpor  $R_{TH(c-h)} = 0,344 \text{ K/kW}$ . Nejvyšší optimální teplota přechodu je  $125 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Teplota vody v chladícím okruhu je  $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .



Obr. 4.1: Schéma odvodu tepla vytvořeného ztrátovým výkonem z polovodičové struktury součástky

#### 4. Výběr komponent a návrh 3D modelu napěťového střídače

Teplotní odpor přechod - pouzdro	Pro IGBT	$R_{TH(j-c)T}$	0,0255	K/W
Teplotní odpor přechod - pouzdro	Pro diodu	$R_{TH(j-c)D}$	0,037	K/W
Teplotní odpor pouzdro - chladič	S použitím tepelné folie ALF 5 s teplotním odporem na palec <sup>2</sup> 0,009 K/W	$R_{TH(c-h)}$	0,344	K/kW
Teplotní odpor chladič - kapalina		$R_{TH(h-w)}$	0,015	K/W
Teplota kapaliny		$T_w$	40	°C
Maximální teplota přechodu		$T_{jm}$	150	°C
Optimální teplota přechodu		$T_j$	-40 ÷ 125	°C

Tab. 4.6: Parametry pro výpočet kritických hodnot chlazení

Suma tepelných odporů od zdroje ztrátového výkonu k chladiči:

$$R_{TH \Sigma(j-h)} = \frac{\frac{R_{TH(j-c)T} \cdot R_{TH(j-c)D}}{R_{TH(j-c)T} + R_{TH(j-c)D}} / 2 + R_{TH(c-h)}}{3} \quad (4.10)$$

$$R_{TH \Sigma(j-h)} = \frac{\frac{0,0255 \cdot 0,037}{0,0255 + 0,037} / 2 + 0,344 \cdot 10^{-3}}{3} = 2,631 \cdot 10^{-3} K/W \quad (4.11)$$

Tepelná ztráta mezi chladičem a okolím:

$$\Delta T_{h-w} = R_{THh-w} / 3 \cdot \Delta P_Z = 0,015 / 3 \cdot 7807,7 = 39,04 K \quad (4.12)$$

Teplota povrchu chladiče:

$$T_h = T_w + T_{h-w} = 40 + 39,04 = 79,04^\circ C \quad (4.13)$$

Tepelná ztráta mezi přechodem a chladicí kapalinou:

$$\Delta T_{j-w} = (R_{TH \Sigma(j-h)} + R_{THh-w} / 3) \cdot \Delta P_Z = (2,631 \cdot 10^{-3} + 0,015 / 3) \cdot 7807,7 = 59,58 K \quad (4.14)$$

Teplota přechodu:

$$T_j = \Delta T_{j-w} + T_w = 59,58 + 40 = 99,58^\circ C \quad (4.15)$$

Teplota PN přechodu nepřesáhne optimální hodnotu 125 °C, vybraný chladič a navržené řešení vyhovuje požadavkům.

##### **4.3.3 Popis chladicího systému**

Chladicí systém je tvořen strojně upravenými chladiči, podle přiloženého výkresu, WP 16/180. Pro přenos tepla z IGBT modulu do chladiče je na kontaktní plochu nanесena hliníková fólie s vrstvou silikonu, který při zahřátí expanduje o 15 ÷ 20 % a poté jeho objem zůstává na zvýšené hodnotě, tím je zajištěno vyplnění povrchové struktury kontaktních ploch. Tato fólie zvyšuje tepelnou vodivost mezi modulem a chladičem.

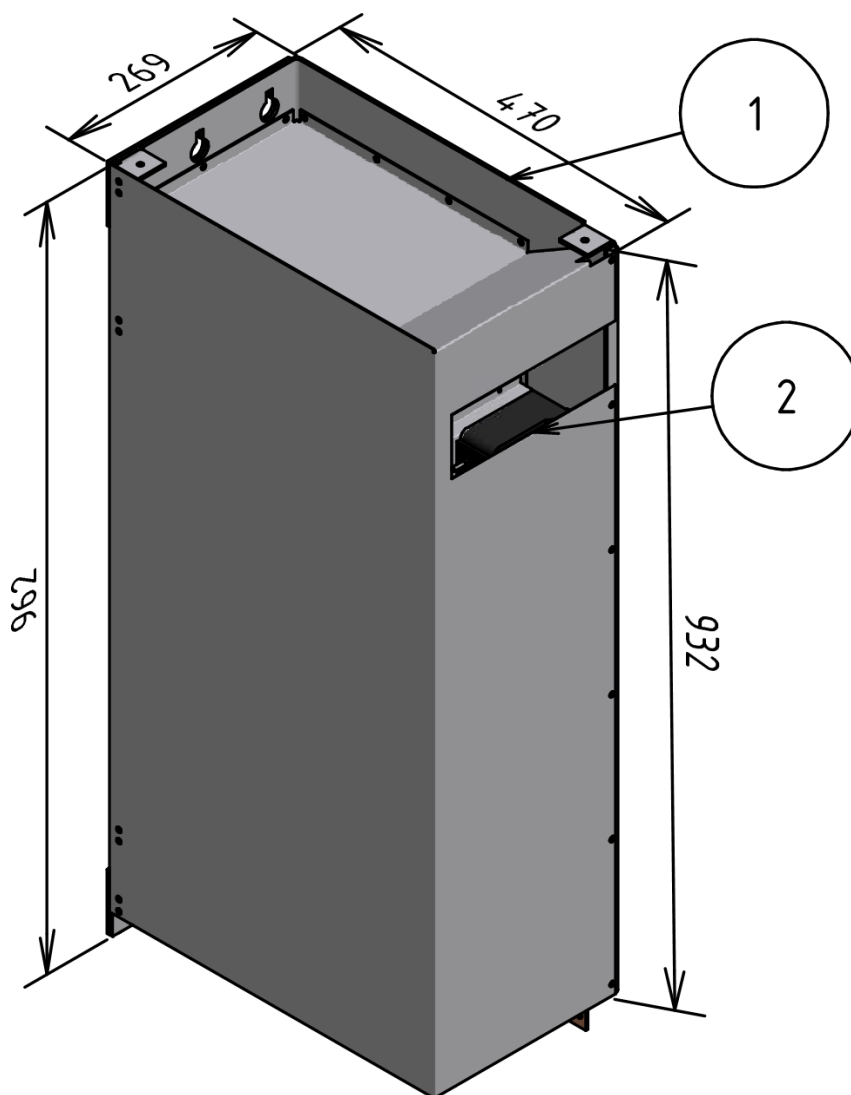
Boční plocha chladiče s vyfrézovanou drážkou pro propojení vrtání chladiče je zazátkována měděnou pásovinou a utěsněna pomocí lepicího těsnění, např. Loctite 573 – plošným těsněním. V opačné boční ploše chladiče jsou přišroubovány mosazné přechodové vsuvky a dále navazuje systém potrubí vytvořeny z letovacích měděných tvarovek a měděného potrubí, které jsou spojovány tvrdým pájením.

Připojení na vnější okruh chladicí kapaliny je tvořen přechodovou vsuvkou s vnějším trubkovým závitem  $\frac{3}{4}$ “.



#### 4.4 3D model napěťového střídače

V této části diplomové práce je popisován 3D model napěťového střídače, jeho konkrétní detailní řešení se zdůvodněním smyslu důležitých konstrukčních prvků.

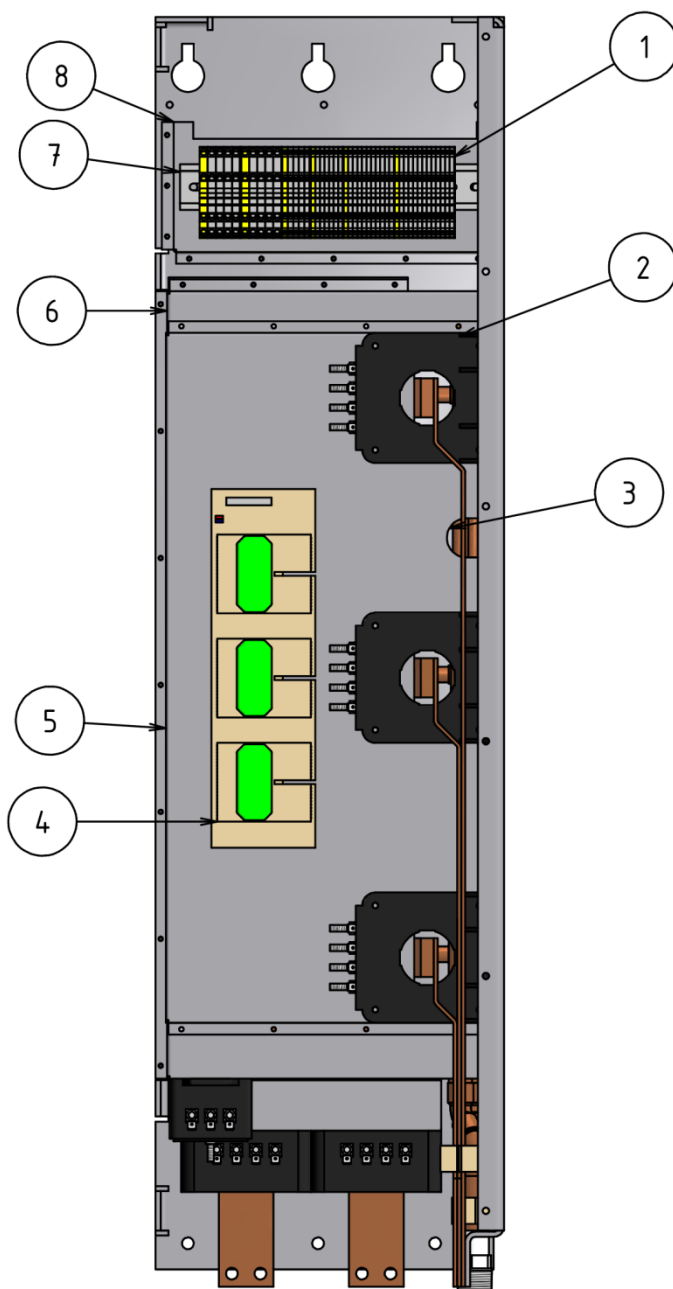


*Obr. 4.2: Celkový pohled na 3D model napěťového střídače s hlavními rozměry*

Na obrázku 4.2 je zobrazen celkový pohled na napěťový střídač. Jsou zde zobrazeny základní vnější rozměry střídače, zadní stěna střídače s montážními otvory pro jeho zavěšení je z důvodu snadného přístupu ke spodním úchytným šroubům prodloužena. Pod číslem 1 je základní nosný plechový profil o tloušťce plechu 4 mm, na kterém je soustředěna veškerá nosnost celého zařízení. V horní části jsou díry pro přišroubování závěsných ok při manipulaci

#### 4. Výběr komponent a návrh 3D modelu napěťového střídače

s měničem, přední díra dále slouží na zajištění měniče při provozu a pro omezení působení dynamických sil na zadní stěnu. Č. 2 označuje horní kryt střídače.

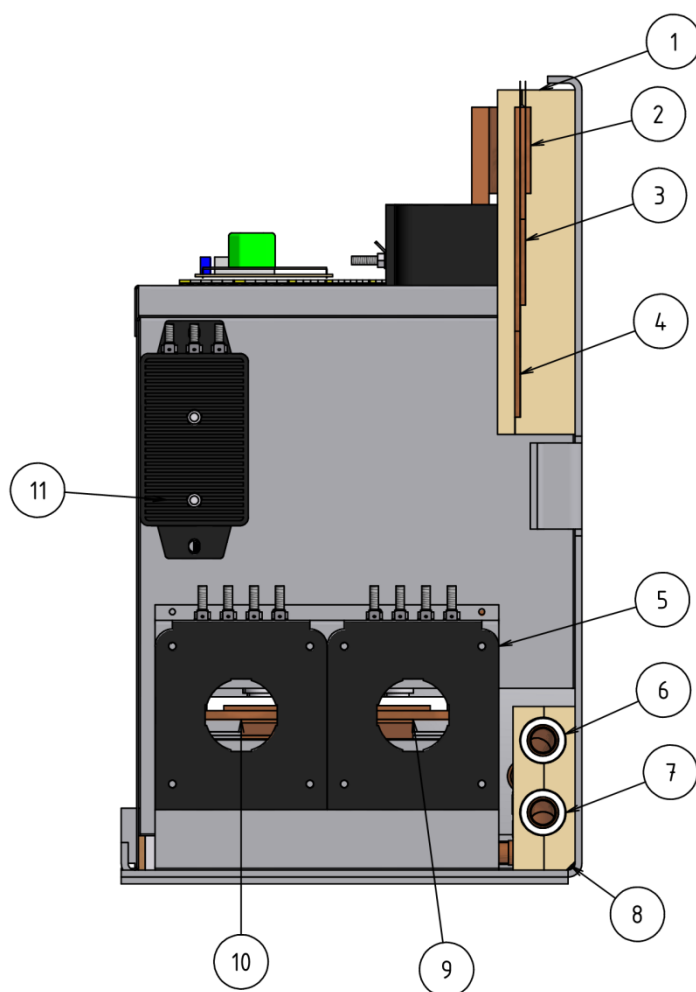


*Obr. 4.3: Čelní pohled na napěťový střídač*

Na obrázku 4.3 je čelní pohled na model střídače. Č. 1 ukazuje na svorkovnice X1 – X6 pro připojení obvodů nutných pro funkci střídače, pod č. 2 jsou proudové snímače s halovou sondou pro měření výstupního proudu tekoucího do napájeného motoru. Č. 3 znázorňuje průchod

#### 4. Výběr komponent a návrh 3D modelu napětového střídače

krycími plechy do vnitřní části měniče pro umístění vodičů k buzení výkonových IGBT modulů a k tepelným ochranám pro hlídání teploty chladičů. Č. 4 ukazuje na desku plošného spoje s osazenými budiči pro výkonové IGBT moduly, č. 5 znázorňuje plech pro montáž výstupních proudových snímačů a budičů. V plechu č. 6 jsou uchyceny kondenzátory DC obvodu a tvoří stínění okolí proti elektrostatickému rušení vznikajícímu při spínání výkonových IGBT modulů. Pod č. 7 je DIN lišta pro uchycení svorkovnic. Plech č. 8 je určen pro umístění řídicí elektroniky a pomocných elektronických obvodů.

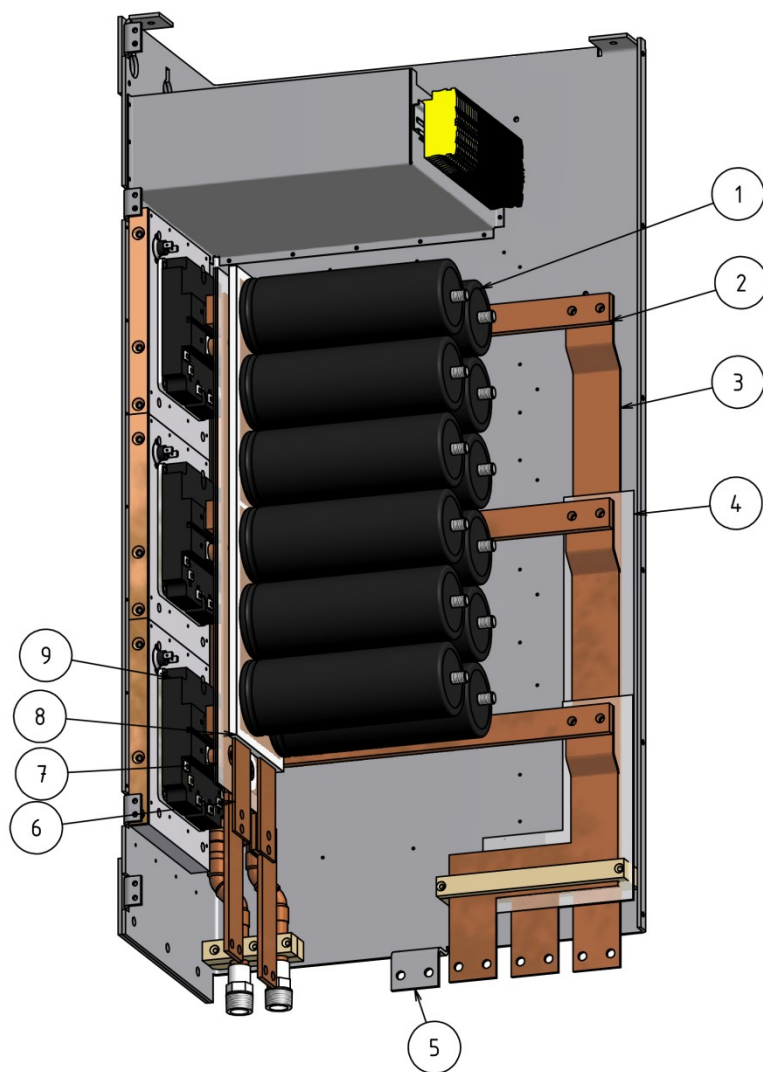


*Obr. 4.4: Spodní pohled na napětový střídač*

Na obrázku 4.4 je spodní pohled na střídač. Pod č. 1 je díl pro upevnění elektrických vývodů měniče, tento díl je vyroben z elektroizolačního materiálu. Č. 2 je svorka GS:W, č. 3 je svorka GS:V a č. 4 je svorka GS:U, tyto svorky jsou pro připojení napájeného motoru lokomotivy. Pod č. 5 jsou proudové snímače pro měření vstupního proudu měniče. Č. 6 představuje vývod chladicí kapaliny s připojením na trubkový závit  $\frac{3}{4}$ ", č. 7 představuje přívod

#### 4. Výběr komponent a návrh 3D modelu napěťového střídače

chladicí kapaliny se stejným připojením. K těmto vývodům je nutné připojit pružné mezikusy, aby nedocházelo k přenosům vibrací a rázů na vnitřní chladicí systém měniče. Pod č. 8 je díl pro upevnění potrubí chladicího systému, mezi potrubím a upevňovací díl je nutno vložit pryžovou podložku pro pevné sevření potrubí. Č. 9 je svorka pro připojení kladného napájecího napětí měniče GS:DCP a č. 10 je záporná svorka GS:DCN. Č. 11 představuje napěťový snímač pro snímání napětí v DC obvodu.

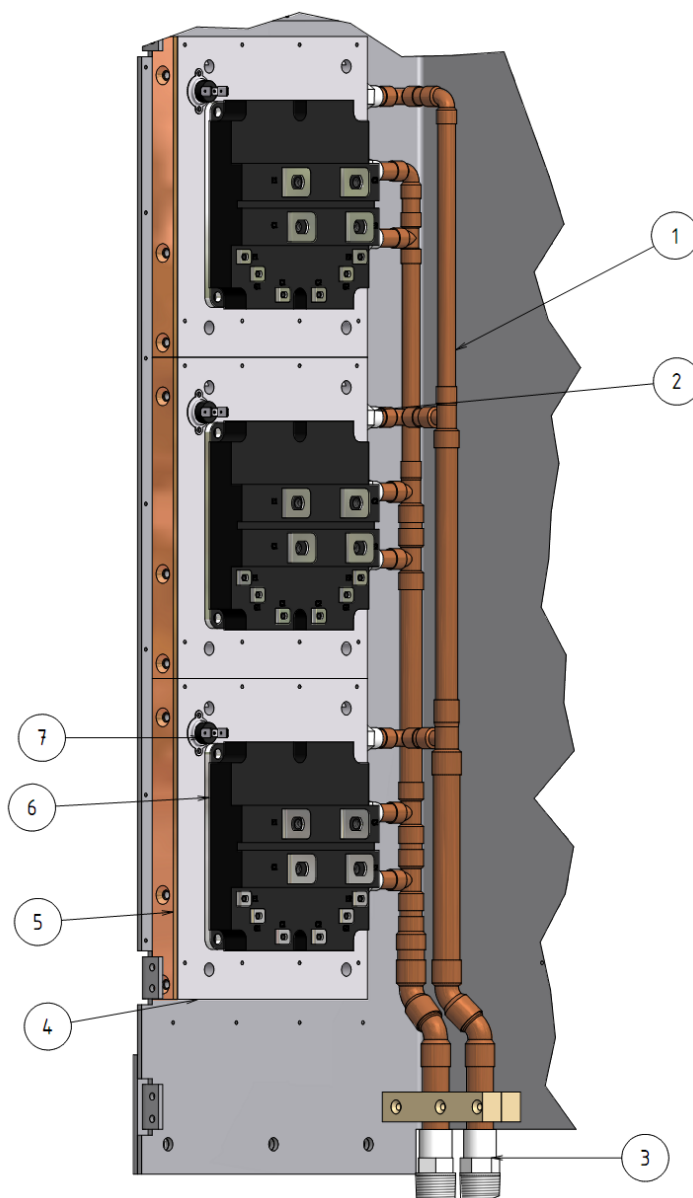


*Obr. 4.5: Pohled na výkonovou část napěťového střídače*

Na Obrázku 4.5 je pohled na výkonovou část střídače. Pod č. 1 je kondenzátorová baterie připojená k DC obvodu, která je v horní části upevněna do plechu č. 6 z obrázku 4.3 pomocí šroubů v jejich konstrukci. Č. 2 ukazuje na výkonové měděné pásovinu vedené od výkonových IGBT modulů. Na tyto pásovinu navazují měděné plechy pod č. 3, které jsou tvarovány tak, aby

#### 4. Výběr komponent a návrh 3D modelu napěťového střídače

ležely na sobě. Mezi nimi je vložena elektroizolační fólie č. 4. Pod č. 5 je svorka pro připojení stínění kabelu pro napájení motoru. Č. 6, 7 a 8 ukazují na systém plochých přípojníc pro připojení DC obvodu ke kondenzátorové baterii a k výkonovým IGBT modulům. Tato přípojnice je tvořena tvarovanými měděnými plechy, které jsou mezi sebou izolovány elektroizolační fólií a díly z elektroizolačního materiálu. Tyto sestavy přípojníc jsou slepeny do jednotlivých bloků (pro kondenzátorovou baterii a pro výkonové IGBT moduly) konstrukčním lepidlem např. Teroson Terokal 2444 od výrobce Henkel. Č. 9 ukazuje na výkonové IGBT moduly.



Obr. 4.6: Výřez pohledu na chladicí systém napěťového střídače

#### 4. Výběr komponent a návrh 3D modelu napěťového střídače

Na obrázku 4.6 je zobrazen výřez chladicího systému s výkonovými moduly. Propojení jednotlivých chladičů je proveden měděnými trubkami a tvarovkami spojovanými tvrdým pájením, označeny č. 1. Pro napojení chladiče na měděné trubky je do chladiče vyvrtán 3/8“ trubkový závit a našroubovaná mosazná přechodová vsuvka č. 2. průměr trubek je od jednotlivých odboček snižován respektive zvyšován pro docílení optimálního průtoku jednotlivými větvemi. Připojení chladicí kapaliny na vnější chladicí okruh je proveden mosaznými přechodovými vsuvkami s vnějším trubkovým závitem 3/4“ označenými č. 3. Č. 4 ukazuje na chladič od výrobce Semikron s označením WP16/180. Tento chladič musí být strojně upraven pro propojení chladicího okruhu (frézovaná drážka z levé strany chladiče) a vyvrtány závity a otvory pro uchycení příslušných konstrukčních částí střídače a výkonových IGBT modulů. Pod č. 5 je zobrazena zátká s měděné pásovinu upevněna lepícím těsněním a šrouby se zápusťnou hlavou. Č. 6 ukazuje na výkonový IGBT modul, který je na chladič přišroubován šesti šrouby. Na plochu mezi chladič a modul je nanášena hliníková teplovodná fólie pro snížení přechodového odporu. Č. 7 ukazuje na tepelnou ochranu zajišťující hlídání teploty jednotlivých chladičů a při překročení kritické hodnoty rozpojení kontrolního obvodu zavedeného do řídicího systému.

## **Závěr**

Zadáním diplomové práce bylo vytvořit 3D model hlavního měniče akumulátorové lokomotivy napájeného z akumulátoru 800 V a s připojeným třífázovým asynchronním trakčním motorem o jmenovitém výkonu 300 kW. Vytvoření modelu předcházelo seznámení s problematikou elektrické trakce, dimenzování měniče, návrh elektrických schémat, výběr a dimenzování jednotlivých součástí a komponent měniče a jeho konstrukce.

Navržený 3D model je vyobrazen a popsán v kapitole 4.4. Jako hlavní měnič byl zvolen s ohledem na výkon a velikost tepelných ztrát v měniči napěťový střídač s vodním chlazením. Při zvolení této koncepce měniče s vodním chlazením bylo nutné vytvořit vhodný návrh chladicího systému. Vlastní vodní chladič není v diplomové práci navrhován, ale je převzat polotovar chladiče pro výkonové polovodičové prvky s již určenými parametry. Hlavní výkonové prvky střídače tvoří výkonové IGBT moduly a kondenzátorová baterie DC obvodu. Pro možnost regulace a řízení měniče je nutno snímat některé elektrické veličiny v měniči, proto je měnič vybaven snímači proudu pro měření vstupních a výstupních proudů a snímačem napětí pro měření napětí v DC obvodu.

V práci je navržen konstrukční model měniče s rozmístěním jednotlivých prvků s ohledem na technické normy ČSN EN 50124-1, ČSN EN 61287-1 a ČSN EN 50155. Cílem práce nebylo navrhování řídicích a regulačních obvodů, ale v konstrukčním návrhu je brán ohled na požadavky pro toto zařízení a je vytvořen prostor pro jeho umístění.

3D model hlavního měniče akumulátorové lokomotivy poslouží při dalším postupu vývoje a realizace měniče. Model ukazuje možnosti rozmístění komponent a rozměrové možnosti vzhledem k typovému výkonu, dále možnosti konstrukčních řešení některých částí měniče.

## Literatura

- [1] Danzer, J., *Elektrická trakce 1. Přehled problematiky*, 2. vydání. Plzeň: Západočeská univerzita, 2004. 69 s.
- [2] Vondrášek, F., *Výkonová elektronika, svazek 1, Přehled výkonových polovodičových součástek*. Plzeň: Západočeská univerzita, 1994. 73 s. ISBN 80-7082-1363-1
- [3] Danzer, J., *Elektrická trakce 2. Stupňovité řízení sériového motoru*, 2. vydání. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006. 68 s.
- [4] Danzer, J., *Elektrická trakce 3. Plynulá regulace cize buzeného motoru*, 2. vydání. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006. 95 s.
- [5] Danzer, J., *Elektrická trakce 4. Vozidla s asynchronním trakčním vozidlem*, 2. vydání. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006. 103 s.
- [6] Data list IGBT modulu FF800R17KP4\_B2, <www.infineon.com>, 23. 2. 2011
- [7] Data list kondenzátoru K01500682\_\_M0J214, <www.kendeil.com>, 21. 11. 2010
- [8] Data list proudového snímače LTC 600, <www.lem.com>, 15. 3. 2011
- [9] Data list napěťového snímače AV 100, <www.lem.com>, 15. 3. 2011
- [10] Katalog: Rail – mounted terminal block systems, <www.wago.com>, 30. 3. 2011
- [11] Leuchter, J.; Bauer, P., Analýza ztrát v nepřímých výkonových měničích. In Seminář Teorie Obvodů (STO-9). Brno: UO v Brně, 2005. s. 117-120. ISBN 80-7231-011-9.



## **Seznam příloh**

### **Elektrická schémata:**

1. Schéma výkonové části pohonu lokomotivy
2. Obvodové schéma výkonové části střídače
3. Použití jednotlivých svorkovnic

### **Konstrukční schémata:**

1. Základový plech (rozměry tvaru)
2. Základový plech (rozmístění děr a závitů)
3. Vrchní kryt
4. Plech pro upevnění kondenzátorů
5. Plech pro upevnění výstupních I snímačů
6. Plech pro umístění ŘO
7. Plech pro upevnění vstupních I snímačů
8. Distance na spodní stěnu střídače
9. Vývod DC
10. Přípojnice DCP, DCN
11. Sestavy přípojníc pro kondenzátorovou baterii
12. Přípojnice fázové
13. Elektroizolace pro sestavu C přípojníc
14. Elektroizolační fólie
15. Upevňovací konstrukční prvky
16. Chladič WP 16/180 + zátka chladiče
17. Sestava hlavních konstrukčních prvků